

# Масштабирование импульсно-периодических электроразрядных широкоапертурных лазеров

А.В.Андрюманов, С.А.Кабаев, Б.В.Лажинцев, В.А.Нор-Аревян, В.Д.Селемир

*Проанализированы основные причины, затрудняющие увеличение энергии и средней мощности излучения в широкоапертурных электроразрядных лазерах. Сформулированы физические и технические требования, предъявляемые к конструкции лазерной камеры и к источнику накачки лазера для получения высоких технических характеристик. Предложена конструкция лазера, состоящая из отдельных, электрически не связанных модулей, расположенных вдоль оптической оси. В основу устройства лазерной камеры отдельного модуля положена новая конструкция электродного узла, в которой оба электрода выполнены из набора электрически изолированных друг от друга пластин, соединенных с общими шинами источника накачки стабилизирующими индуктивностями. В электроразрядных химических лазерах на HF и DF с такими электродными узлами и межэлектродными промежутками 12 см получены технические КПД 3.5 и 2.4 % при удельных энергосъемах до 4.2 и 2.9 Дж/л соответственно. Предложена конструкция широкоапертурных электроразрядных лазеров на основе несущих цилиндрических оболочек.*

**Ключевые слова:** электроразрядный лазер, масштабирование, стабилизация разряда, HF(DF)-лазер.

## 1. Введение

В настоящее время известен ряд работ, в которых исследуются работающие в режиме однократных импульсов широкоапертурные электроразрядные лазеры, такие как нецепные химические HF(DF)-лазеры [1], CO<sub>2</sub>-лазеры [2, 3] и эксимерные XeCl-лазеры [4, 5]. Аналогичные лазеры могут быть созданы и для работы в импульсно-периодическом режиме (см., напр., [6]). Для формирования поперечного газового потока в этом случае придется изменить геометрию разрядного промежутка, а также место расположения источника накачки. Это приведет, скорее всего, к ухудшению лазерных параметров. Развитие широкоапертурных импульсно-периодических электроразрядных лазеров (ИПЭЛ) сдерживается сложностью физических и технических проблем, возникающих при их создании. Кроме того, отсутствует концепция построения широкоапертурных ИПЭЛ, которая позволила бы относительно просто масштабировать параметры таких лазеров.

Рассмотрим основные причины, затрудняющие рост энергии и средней мощности излучения широкоапертурных ИПЭЛ. Увеличение энергии излучения может достигаться за счет наращивания апертуры разрядного промежутка и соответственно энергии накачки на единицу активной длины лазера. Это приводит к возрастанию габаритов емкостного накопителя источника накачки и его удалению от центра разрядного промежутка. В результате увеличивается индуктивность разрядной цепи и, как следствие, длительность разряда, что нередко ведет к развитию неустойчивостей в плазме разряда. Появляются трудности и в согласовании растущего волнового сопротивления источника накачки с импедансом плазмы

объемного разряда. Рассогласование приводит к еще большему увеличению длительности ввода энергии в плазму разряда. В результате искровые пробои разрядного промежутка могут возникнуть и на второй половине импульса напряжения. Искровые пробои промежутка приводят к снижению ресурса электродной системы и провоцируют возникновение больших локальных температурных неоднородностей на поверхности электродов. Увеличение межэлектродного промежутка должно сопровождаться увеличением энергии источника накачки и практически пропорциональным увеличением его напряжения. В результате возрастает нагрузка на коммутаторы в цепи энергоснабжения лазера.

Наращивание энергии излучения лазера можно осуществить также за счет увеличения длины разряда. Иногда это сопровождается секционированием разрядного промежутка. При этом растет отношение  $L_{\text{las}}/L_{\text{in}}$ , где  $L_{\text{las}}$  – размер лазера вдоль оптической оси, а  $L_{\text{in}}$  – суммарная длина разрядного промежутка. Предельная длина лазера ограничена внутренними потерями в его активной среде.

При переходе к импульсно-периодическому режиму работы широкоапертурного электроразрядного лазера возникают дополнительные трудности. Они прежде всего связаны с формированием потока газовой среды в разрядном промежутке и с размещением источника накачки лазера. При этом вследствие развития приэлектродных возмущений и возмущений плотности газа в рабочем объеме снижается длительность устойчивой фазы объемного разряда.

## 2. Концептуальные подходы к созданию широкоапертурных ИПЭЛ

В работах [7, 8] были предложены некоторые пути решения проблемы создания широкоапертурных лазеров. Первоначально в [7] была предложена новая конструкция электродного узла, в которой каждый из элект-

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607188 Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37; тел.: (83130) 4 55 84, факс: (83130) 4 53 84, e-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

Поступила в редакцию 27 февраля 2002 г.

родов выполнен из набора электрически изолированных друг от друга пластин, соединенных с общими шинами источника накачки отдельными стабилизирующими индуктивностями. Испытание такой конструкции проводилось на активной среде электроразрядного химического HF-лазера [9, 10]. Эксперименты показали, что при использовании данной конструкции формируется устойчивый объемный разряд при различной высоте межэлектродного промежутка, реализуются высокие удельные энергосъемы и эффективность генерации. Следует отметить, что впервые выполнение одного из электродов эксимерного KrF(XeCl)-лазера на основе сегментной конструкции с индуктивной стабилизацией предложено в работе [11].

Создание ИПЭЛ с большим объемом активной среды и высокими техническими характеристиками связано с выполнением ряда в целом известных физических и технических требований. К ним относятся: реализация максимально высоких удельных энергосъемов и эффективности лазера, минимизация используемых напряжений электрических устройств лазера, уменьшение длительности импульса тока разряда, снижение энерговыделения при случайном искровом пробое разрядного промежутка, снижение скорости прокачки и расхода газа в рабочем промежутке, уменьшение расстояния между электродами соседних секций при секционировании лазера по его длине, использование электродов простой конструкции, формирование устойчивого разряда в широком диапазоне изменения состава рабочей среды при невысоком требовании к точности установки электродов, реализация достаточно простых конструкций тоководов, газового контура, лазерной камеры и источника накачки, максимальное снижение интенсивности рассеянного электромагнитного излучения и уменьшение весогабаритных характеристик лазера. Реализация перечисленных требований при создании широкопертурных лазеров на основе известных на сегодняшний день конструкций ИПЭЛ вызывает определенные трудности.

Рассмотрим возможность выполнения этих требований в лазере с пластинчатыми электродами и индуктивной стабилизацией разряда. В таком лазере значительно увеличена устойчивость разряда, а также снижено энерговыделение при случайном искровом пробое разрядного промежутка. Это достигается за счет использования стабилизирующих индуктивностей, ограничивающих быстрое локальное нарастание плотности тока разряда. В лазере возможно формирование потока газа через пластинчатые электроды. Конденсаторы емкостного накопителя лазера в этом случае могут располагаться максимально близко к разрядному промежутку с двух его боковых сторон (тоководы в этом варианте имеют минимальные размеры). Такое расположение источника накачки невозможно при использовании сплошных электродов в лазере с поперечной прокачкой активной среды. Аналогичное расположение источника накачки используется в лазерах без газового потока для получения высоких технических характеристик (см., напр., [2, 6]). Таким образом, в прокачном лазере с пластинчатыми электродами возможно предельное уменьшение индуктивности разряда.

В лазере со сплошными электродами длина разрядного промежутка меньше длины электрода из-за скруглений на его концах. Для пластинчатого электрода длина разрядного промежутка равна расстоянию между его

крайними пластинами. При секционировании разрядного промежутка уменьшение расстояния между рядом расположенными секциями провоцирует пробой между электродами соседних секций. Последствия этого пробоя существенно меньше для пластинчатых электродов благодаря стабилизирующим индуктивностям.

В лазере с прокачкой рабочей среды через пластинчатые электроды коэффициент сменности газа может быть близким к единице (необходимо после каждого импульса практически полностью сменить газ, нагретый в межэлектродном промежутке), в то время как в обычной схеме прокачки он нередко составляет 2–3. Пластинчатые электроды формируют равномерный поток газовой среды и совместно с боковыми стенками лазерной камеры могут эффективно демпфировать акустические возмущения в активной среде лазера.

Рассмотрим основные конструктивные подходы, которые могут быть осуществлены при масштабировании электроразрядных лазеров на пластинчатых структурах. В основу конструкции широкопертурного лазера положен модульный подход, предложенный в [7, 8]. Он заключается в создании лазера из отдельных, полностью независимых модулей, плотно расположенных вдоль оптической оси лазера. Построение импульсно-периодического CO<sub>2</sub>-лазера из отдельных, электрически не связанных модулей предложено также в [12], где указано на несомненные преимущества такого подхода. При использовании пластинчатых электродов длина модуля практически совпадает с длиной его разрядного промежутка.

Модули работают независимо и размещены в едином корпусе. В состав модуля входят отдельная секция источника накачки и своя секция электродной системы. Связь источников накачки отдельных модулей в единый источник накачки лазера осуществляется только системой синхронизации и зарядки. В этом случае задача создания лазера сводится к отработке одного модуля с точки зрения его конструкции, электротехники, устойчивости разряда и эффективности. Это значительно снижает затраты и уменьшает время на его разработку. Необходимо отметить, что задача оптимизации модуля является достаточно многоплановой.

Одним из возможных способов реализации модульного подхода является построение ИПЭЛ с большим объемом активной среды с использованием несущих цилиндрических оболочек [8].

На рис.1 приведена принципиальная схема модуля широкопертурного ИПЭЛ с пластинчатыми электродами на основе цилиндрических оболочек [7, 8]. Основные узлы и системы лазерного модуля размещены внутри несущей оболочки 1. Секция источника накачки состоит из двух частей, каждая из которых размещена в своей диэлектрической оболочке 2. Между этими диэлектрическими оболочками установлен пластинчатый электродный узел 3, подсоединенный к секциям источника накачки с помощью токопроводов 4, которые проходят через диэлектрические оболочки. Прокачка газа осуществляется перпендикулярно рабочим поверхностям электродов с помощью вентиляторов 5, например диаметральных. Такая прокачка позволяет уменьшить коэффициент сменности газа до величины, близкой к единице, и снизить мощность прокачивающего устройства. Охлаждение рабочего газа происходит в теплообменнике 6.

Такое конструктивное решение обеспечивает минимально возможную индуктивность подсоединения ис-

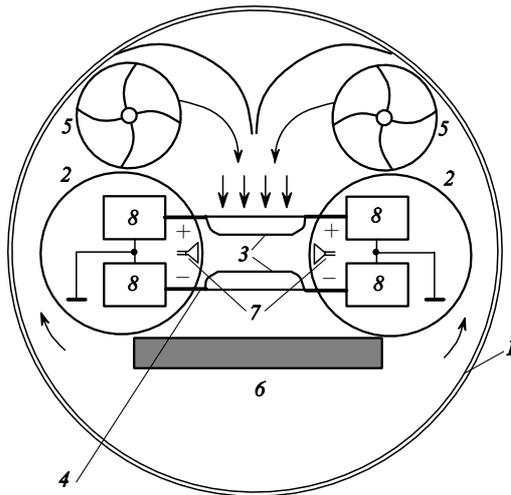


Рис.1. Поперечное сечение модуля широкоапертурного ИПЭЛ с высокой средней мощностью излучения:

1 – несущая оболочка; 2 – диэлектрические оболочки; 3 – пластинчатые электроды; 4 – токопроводы; 5 – диаметрально расположенные вентиляторы; 6 – теплообменник; 7 – источники рентгеновского излучения; 8 – генератор импульсного напряжения; стрелками показано направление газового потока.

точников накачки к электродам лазера. В результате уменьшается время ввода энергии, повышаются устойчивость разряда и эффективность лазера. Очень важно, что в рассматриваемом подходе оптимизацию энергетических характеристик модуля на стадии его отработки можно проводить при использовании секции источника накачки, расположенной лишь с одной стороны от разрядного промежутка. Если источник накачки состоит из двух таких оптимизированных секций, каждая из которых располагается со своей стороны от разрядного промежутка, можно практически вдвое повысить энергию излучения одного модуля. В этом случае ширина разряда должна быть увеличена в два раза по сравнению с одно-сторонним вариантом за счет использования электродов с более широкой рабочей частью. Данный подход существенно упрощает и удешевляет конструктивную отработку, исследование и оптимизацию модуля.

Прозрачные для потока газа электроды лазера представляют собой набор достаточно тонких пластин, электрически изолированных друг от друга. Пластины расположены с определенным шагом по всей длине электрода. Каждая из пластин электрода соединяется внутри камеры через свой индуктивный элемент с участком общей шины указанного электрода. Профиль рабочей кромки по длине пластины выбирается таким образом, чтобы получить необходимую поперечную однородность энерговыделения в разряде. Пластинчатая конструкция электродов дает возможность максимально близко (до нескольких сантиметров) располагать друг к другу электродные системы соседних модулей, что затруднительно при использовании сплошных электродов. Применение высокотехнологичных пластинчатых электродов в сочетании с индуктивной стабилизацией позволяет существенно снизить требования к точности их установки, повысить устойчивость к искрообразованию, снизить энерговыделение в искре.

В качестве генератора импульсного напряжения (ГИН) каждой части секции источника накачки в некоторых случаях целесообразно использовать двухполярный ГИН.

Применение такого ГИН позволяет снизить напряженность электрического поля между конструктивными элементами лазера и его электродами. Предпочтительно создавать ГИН на основе схем с  $LC$ -инверторами. Напряжение на электродах в  $2N$  раз превышает напряжение зарядки, где  $N$  – число  $LC$ -инверторов в ГИН. Для получения крутого фронта импульса напряжения на разрядном промежутке можно использовать разрядник-обостритель.

С целью повышения электробезопасности лазера и уменьшения рассеянного электромагнитного излучения оболочка 1 выполняется либо цельнометаллической, либо из диэлектрика, покрытого металлом. Это улучшает совместимость лазера с другими электротехническими устройствами.

Для равномерной предыонизации активного объема могут быть использованы источники рентгеновского излучения 7. Они могут располагаться на равном расстоянии от обоих электродов вблизи боковых стенок диэлектрических камер 2 в области «земляного» потенциала ГИН либо за достаточно прозрачными для рентгеновского излучения пластинчатыми электродами. Для формирования высокой направленности лазерного излучения при больших активных длинах лазера целесообразно применять систему задающий генератор – усилитель.

По нашему мнению, такие конструктивные подходы могут быть использованы при создании химических, эксимерных и  $CO_2$ -лазеров (особенно лазеров, работающих при больших давлениях активной среды), а также, возможно, электроразрядных иодно-кислородных лазеров.

### 3. Экспериментальная реализация широкоапертурного лазера

Указанные подходы были реализованы при создании нецепного электроразрядного HF(DF)-лазера. Экспериментальное исследование широкоапертурного лазера проводилось с использованием рабочей камеры, изготовленной из стеклопластиковой трубы с внутренним диаметром 300 мм. Электродный узел состоял из двух пластинчатых электродов шириной 100 мм, которые закреплялись внутри камеры с помощью проходных токопроводов. Расстояние между электродами составляло 120 мм. Пластины электродов были изготовлены из листовой меди толщиной 1 мм и имели профилированную рабочую поверхность для формирования необходимой ширины разряда. Электродные пластины были изолированы друг от друга и располагались равномерно вдоль оптической оси лазера с шагом 7 мм. Полная длина разрядного промежутка составляла  $\sim 300$  мм. Каждая из электродных пластин подсоединялась к общей шине источника накачки своего электрода с помощью стабилизирующей индуктивности  $\sim 1$  мкГн.

На торцевых фланцах разрядной камеры располагались пластины из  $CaF_2$ . Использовался внешний резонатор, состоящий из двух диэлектрических зеркал. Камера откачивалась до давления 0.1 Тор и наполнялась рабочей смесью  $SF_6$  с  $H_2(D_2)$ .

Электрическая схема лазера приведена на рис.2. Двухполярный ГИН источника накачки лазера на основе схемы с двумя  $LC$ -инверторами и разрядником-обострителем в земляной цепи располагался с одной стороны разрядного промежутка. В ГИН использовались 100-ки-

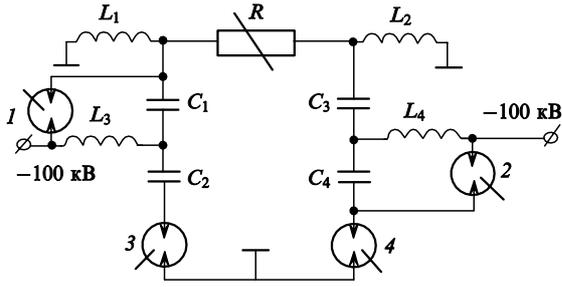


Рис.2. Электрическая схема ГИН лазера:  $C_1 - C_4$  – накопительные конденсаторы;  $L_1$  и  $L_2$  – зарядные индуктивности;  $L_3$  и  $L_4$  – развязывающие индуктивности; 1–4 – управляемые разрядники;  $R$  – активная нагрузка.

ловольтные импульсные конденсаторы КМК-100-0.05 емкостью 50 нФ ( $C_1 - C_4$ ). Зарядка емкостей до напряжения  $U_0 = 40 - 80$  кВ осуществлялась от высоковольтного статического выпрямителя ВС-0.1-100. Для уменьшения индуктивности разрядного контура, повышения безопасности и надежности работы электрической схемы конденсаторы и разрядники помещались в металлический корпус, наполненный трансформаторным маслом. После включения разрядников 1 и 2 через  $\sim 3$  мкс емкости  $C_1$  и  $C_4$  перезаряжаются и напряжение на разрядниках-обострителях 3 и 4 достигает максимальной величины  $\sim 2U_0$ . Емкость ударного разрядного контура составляла 12.5 нФ. За несколько сотен наносекунд до перезарядки емкостей  $C_1$  и  $C_4$  включаются разрядники-обострители и к рабочему промежутку прикладывается напряжение  $\sim 4U_0$  с крутым фронтом нарастания.

Таким образом, для накачки лазера применялся лишь один каскад накопительных емкостей в отличие от работы [1], где использовалось три каскада с разрядником-обострителем между вторым и третьим каскадами.

На рис.3 представлены фотографии свечения разряда в рабочей камере при давлении газа  $\sim 0.1$  атм и зарядном напряжении  $U_0 = 50$  кВ. Видно, что разряд имеет объемный характер. Ширина разряда составляет около 8.5 см. При использовании в качестве рабочего газа чистого  $SF_6$  (рис.3,а) отчетливо наблюдаются стримеры вблизи электродов. При снижении энергии накачки размеры стримеров и интенсивность их свечения существенно уменьшаются. В активной среде химического лазера ( $SF_6 : H_2 = 10 : 1$ ) стримеры практически отсутствуют (рис.3,б), что свидетельствует о более высокой устойчивости разряда при наличии в рабочей смеси водорода. Возмож-

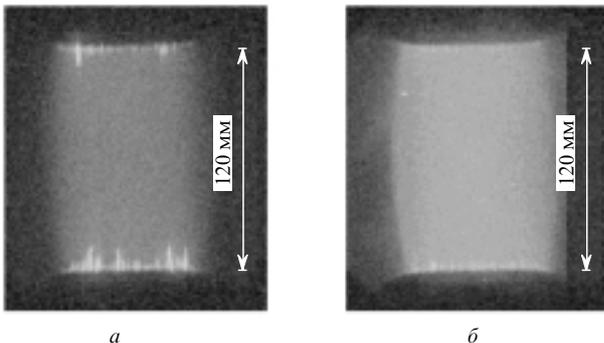


Рис.3. Фотографии свечения разряда при использовании в качестве рабочего газа  $SF_6$  (а) и смеси состава  $SF_6 : H_2 = 10 : 1$  (б).

ность формирования объемного разряда в чистом  $SF_6$  говорит о чрезвычайно высокой устойчивости разряда с индуктивной стабилизацией. В то же время широкоапертурные разряды на цельнометаллических электродах без использования предыонизации имеют объемный характер лишь при наличии в качестве донора водорода углеводородов [1]. При перекашивании примерно четверти пластин таким образом, что расстояние между соответствующими пластинами по высоте разрядного промежутка изменялось на 0.5–0.7 мм, разряд не терял устойчивости, а лазерные параметры не изменялись. Это иллюстрирует пониженные требования к точности установки электродных пластин.

Типичные формы импульса тока разряда и напряжения на рабочем промежутке приведены на рис.4,а. Зависимость введенной в разряд энергии и его активного сопротивления от времени показана на рис.4,б. В плазму разряда вводится примерно 60–65 % энергии, запасенной в накопительных емкостях. Разряд имеет объемный характер при напряжении зарядки емкостных накопителей вплоть до 80 кВ. Дальнейшее увеличение  $U_0$  приводит к рассогласованию волнового сопротивления источника накачки с активным сопротивлением плазмы в рабочем промежутке и возникновению сквозных искровых образований во время второй полуволны импульса напряжения.

Для рабочей смеси состава  $SF_6 : H_2 = 10 : 1$  с общим давлением 84 Тор получена энергия излучения 13.4 Дж при КПД 3.5 %, а для смеси состава  $SF_6 : D_2 = 10 : 1$  с общим давлением 70 Тор энергия составила 9.2 Дж при КПД 2.4 %. При использовании еще одного ГИН, расположенного с другой стороны разрядного промежутка, и увеличении ширины разряда до  $\sim 14 - 17$  см энергия лазера может быть увеличена примерно вдвое.

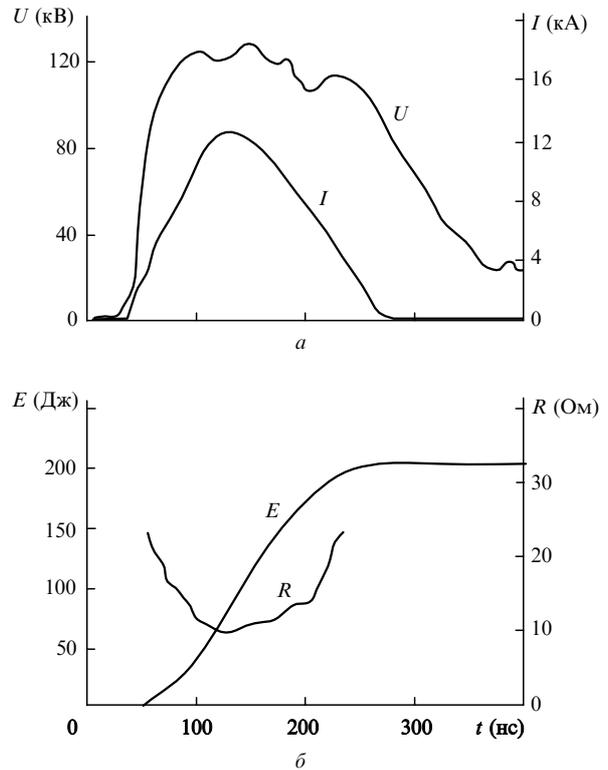


Рис.4. Характерные зависимости тока разряда  $I$ , напряжения на разрядном промежутке  $U$ , сопротивления разряда  $R$  и введенной в разряд энергии  $E$  от времени.

На основе описанной выше конструкции широкоапертурного электроразрядного лазера был изготовлен и затем испытан лазер, работающий в импульсно-периодическом режиме. Лазер состоял из трех последовательно расположенных модулей с прокачкой газовой смеси ( $\text{SF}_6 - \text{H}_2$ ) через пластинчатые электроды. Испытание широкоапертурного HF-лазера с частотой следования импульсов 10 Гц прошло успешно. Таким образом, была подтверждена работоспособность предложенной концепции в импульсно-периодическом режиме и получены основания для ее дальнейшего развития.

#### 4. Заключение

Предложена концепция создания электроразрядных широкоапертурных лазеров, позволяющая устранить сложности, возникающие при их масштабировании. Последовательное применение этой концепции позволит существенно уменьшить временные и материальные затраты на разработку ИПЭЛ и с большой вероятностью обеспечить получение требуемых лазерных параметров. В основу концепции положены модульность конструкции лазерного устройства, применение пластинчатых электродов и индуктивная стабилизация разряда. Наиболее полно концепция реализуется при прокачке газа через электроды и использовании цилиндрических несущих оболочек. На примере химического лазера успешно реализо-

вана предложенная концепция широкоапертурного электроразрядного лазера.

1. Apollonov V.V., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Oreshkin V.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 374 (1998).
2. Гордейчик А.Г., Масленников А.Г., Кучинский А.А., Родичкин В.А., Смирнов В.А., Томашевич В.П., Шестаков И.В., Янкин Е.Г. *Квантовая электроника*, **18**, 1173 (1991).
3. Apollonov V.V., Kazakov K.Kh., Pletnyev N.V., Sorochenko V.R., Astakhov A.V., Baranov G.A., Kuchinsky A.A., Tomashevich V.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 317 (2000).
4. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Молчанов Д.Н., Новиков В.П., Христофоров О.Б. *Квантовая электроника*, **14**, 1542 (1987).
5. Buehler Yu., Makarov M., Suslov A., Yastremsky A. *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 28 (1994).
6. Lacour B., Gagnol C., Prigent P., Puech V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 334 (1998).
7. Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А. Патент РФ № 2105400 (1996); *Изобретения*, № 5, 481 (1998).
8. Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А. Патент РФ № 2134925 (1997); *Изобретения*, № 23, 298 (1999).
9. Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Селемир В.Д. *Квантовая электроника*, **30**, 7 (2000).
10. Lazhintsev B.V., Nor-Arevyan V.A., Selemir V.D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3889**, 732 (1999).
11. Sze R.C. *J. Appl. Phys.*, **54**, 1224 (1983); US Patent № 4601039 (1986).
12. Astakhov A.V., Baranov G.A., Zinchenko A.K., Kuchinsky A.A., Shevchenko Yu.I., Barabanshchikov A.A., Godisov O.N., Kaliteevsky A.K., Sokolov E.N., Baranov V.Yu., Dyadkin A.P., Letokhov V.S., Ryabov E.A., Murugov V.M., Sheremet'ev Yu.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 408 (1998).